

К ВОПРОСУ ИЗУЧЕНИЯ РАЗДЕЛА “ГЕМОДИНАМИКА” В КУРСЕ МЕДИЦИНСКОЙ И БИОЛОГИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Баранов А.П., Ядройцева И.А., Макеенко Г.И.

*УО «Витебский государственный ордена Дружбы народов
медицинский университет»*

Гемодинамика – это наука, изучающая законы движения крови по сосудистой системе. Общие законы течения жидкости, изучаемые гидродинамикой в классической физике, являются теоретической основой для описания гемодинамических процессов в живом организме. Однако, сложная организация реальной системы кровообращения, специфические свойства движущейся крови, механические характеристики кровеносных сосудов и другие факторы вызывают ряд трудностей в решении задачи количественного описания гемодинамических процессов и, соответственно, требует определенных методических подходов при изучении данного раздела в курсе медицинской и биологической физики. Только на основе количественных закономерностей системы кровообращения возможно глубокое понимание гемодинамических явлений в норме и патологии, разработка методов диагностики и лечения целого ряда заболеваний.

Изучение гемодинамики в курсе медицинской и биологической физики невозможно без предварительного рассмотрения основных понятий и законов гидродинамики. Для движущейся жидкости вводятся такие характеристики как линии тока, вязкость, давление, линейная и объемная скорости,

определяются понятия ламинарного и турбулентного течения, устанавливается связь между скоростью ламинарного течения жидкости и площадью поперечного сечения, через которую она протекает (условие неразрывности струи). Следует обязательно указать, что условие неразрывности струи выполняется и в реальной гемодинамике, где формулировка этого условия звучит следующим образом: в любом сечении сердечно-сосудистой системы объемная скорость кровотока одинакова. Причем подчеркивается, что под площадью сосудистой системы понимается суммарная площадь кровеносных сосудов одного уровня ветвления и, что сумма поперечных сечений всех функционирующих капилляров примерно в 800 раз больше сечения аорты, а линейная скорость в аорте равна 0,4-0,5 м/с, в капиллярах – около 0,5 мм/с.

Основным количественным соотношением, описывающим течение идеальной жидкости, и вытекающим из закона сохранения энергии, является уравнение Бернулли, позволяющее ввести понятия: статическое, динамическое, полное давление и указать способы их измерения. Уравнение Бернулли и вытекающие из него следствие для горизонтально расположенных сосудов, обуславливающее всасывающее действие струи, позволяет установить связь между площадью сечения сосуда и статическим давлением и дает возможность объяснить некоторые нарушения гемодинамических показателей сосудистой системы. Например, закупорку артерии в случае образования атеросклеротической бляшки на определенном её участке, обуславливающего уменьшение поперечного сечения и, соответственно, статического давления (p). При этом следует пояснить, что кровоток в этом случае возможен, если $p - p_0 > 0$, где p_0 - наружное давление, которое можно считать равным атмосферному. Следует подчеркнуть, что если диаметр сосуда станет меньше определенного минимального значения, то его просвет под действием p_0 в месте расположения бляшки может закрываться, и только в результате работы сердца с повышенной нагрузкой кровь будет протекать с усилием через сужение, что будет создавать артериальный шум, свидетельствующий о нарушении нормального кровотока и переходе ламинарного течения в турбулентное в месте сужения сосуда.

Основываясь на зависимости статического давления от сечения сосуда, можно теоретически объяснить расширение такого патологического проявления как аневризма, возникающего вследствие снижения прочностных и упругих свойств стенок

кровеносного сосуда, указав, что статическое давление в месте вздутия будет больше давления на основном участке сосуда. Избыточное давления будет стремиться расширить вздутие, что приведёт к большему замедлению скорости кровотока в деформированной части сосуда и дальнейшему повышению статического давления, при котором возможен разрыв сосуда.

При изучении реологических свойств крови, как неньютоновской вязкой жидкости, представляющей собой суспензию форменных элементов в плазме, следует подчеркнуть, что 93% из общего их числа представлено эритроцитами, характерным свойством которых является их тенденция к образованию агрегатов, условия образование которых в крупных и мелких сосудах различны и связаны в первую очередь с диаметрами сосуда, агрегата и эритроцита. Это позволяет отметить, что внутренняя структура крови, а следовательно, и её вязкость оказывается неодинаковой вдоль кровеносного русла и показать, что эти факторы влияют на вязкость крови в норму и при различных патологиях (анемия, полицитемия).

При изучении распределения среднего давления в различных участках сосудистого русла необходимо, используя формулу Пуазейля, ввести понятия гидравлического сопротивления и подчеркнуть, что оно зависит от вязкости крови и обратно пропорционально радиуса сосуда в четвёртой степени, а это позволит объяснить, почему наибольшее падение давления наблюдается в артериолах и капиллярах. Формула Пуазейля позволит определить некоторые характеристики кровотока. Например, зная объёмную скорость кровотока и величину гидравлического сопротивления, можно найти величину давления крови в любой точке сосудистой системы. Прибегая к аналогии между законами гидродинамики и законами протекания электрического тока, следует показать что, гидравлическое сопротивление отдельных участков сосудистой системы может быть определено по формуле для расчёта общего сопротивления электрической цепи, состоящей из набора отдельных резисторов, включённых последовательно или параллельно.

Учитывая сложность системы, кровообращения, следует отметить, что при изучении изменений гемодинамических показателей (например, давления, объёмной скорости поступления крови в аорту) возникает необходимость прибегать к физическому и математическому моделированию. Как пример использование модельного представления следует остановиться на

гидродинамической модели Франка (модель упругого резервуара), которая, несмотря на достаточную простоту, позволяет составить систему уравнений, решаемую относительно $p(t)$; $Q(t)$ и получить зависимость давления, объёмной скорости в резервуаре после систолы от времени. Следует отметить, что кривые зависимости представляют собой экспоненты, которые верно описывают реальные процессы.

На основе механической модели по аналогии необходимо представить упрощенную электрическую модель, сопоставляя элементы сосудистой системы и электрической цепи.

Таким образом, при изучении сердечно-сосудистой системы следует учитывать, что это нелинейная система со сложными взаимно обратными связями, анализ которой необходимо проводить исходя из системного подхода к разнообразным процессам, протекающими в ней.